

5. Снегирёв А.Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 143 с.

УДК 662.76

**К. А. Золотухин, Т. Ф. Богатова**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## **АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ ГТУ**

### **Аннотация**

*Различные способы повышения эффективности газотурбинных установок (ГТУ) проанализированы в настоящей работе. Рассмотрены возможности повышения экономичности цикла газотурбинных установок. Проанализировано влияние введения промежуточного охлаждения, промежуточного подогрева и регенерации на эффективность газотурбинного цикла. Выполнен анализ эффективности различных циклов. Приведена оценка эффективности работы ГТУ в зависимости от степени повышения давления воздуха в компрессоре. Показано, что высокий КПД газотурбинной установки не гарантирует высокий КПД парогазовых установок (ПГУ); применение промежуточного охлаждения воздуха и подогрева газов позволяет повысить эффективность применения газотурбинных установок в составе ПГУ. Проведен анализ оптимальных значений степени повышения давления, влияние промежуточного подогрева газов и промежуточного охлаждения воздуха. Приведен опыт разработок ГТ с высокой степенью повышения давления.*

**Ключевые слова:** газотурбинная установка; промежуточное охлаждение; промежуточный подогрев; регенерация; КПД; удельная мощность ГТУ.

### **Abstract**

*Various ways of increase in efficiency of gas-turbine units (GTU) have been analyzed in this work. The possibilities of increase in performance efficiency of gas-turbine units are considered. Influence of introduction of intercooling, reheating and regeneration on efficiency of a gas-turbine cycle is analyzed. The analysis of efficiency of various cycles is made. Assessment of GTU efficiency depending on increase in pressure ratio of air in the compressor is given. It is shown that the high efficiency of gas-turbine installation does not guarantee the high efficiency of the CCGT; application of intercooling of air and reheating of gases allows to increase the efficiency of GTU application in structure of the CCGT. The analysis of optimum values of pressure ratio and the analysis of influence of intermediate gases heating and intermediate air cooling are carried out. The experience of developments of GT with high pressure ratio is given.*

**Key words:** gas-turbine installation; intercooling; reheating; regeneration; efficiency; specific power of GTU.

Одним из основных направлений повышения КПД ГТУ является повышение начальной температуры газов перед ГТ. Это требует решения вопросов разработки новых материалов и технологий изготовления лопаток, совершенствования систем охлаждения элементов ГТ, внедрения жаропрочных покрытий. В современных ГТУ достигнут температурный уровень 1500 °С (компания Siemens, GE) – 1600 °С (компания МНІ). Анализ показателей

эффективности показывает, что ГТУ простого цикла практически приблизились к технически возможному максимуму по экономичности. При дальнейшем увеличении температуры темп роста КПД ГТУ снижается, при этом трудности реализации серьезно возрастают.

Увеличение экономичности может быть достигнуто за счет резервов, связанных с карнотизацией цикла ГТУ. Комбинирование газотурбинного цикла Брайтона с циклом Карно обеспечивает повышение тепловой эффективности по сравнению с простым циклом ГТУ примерно на 25-30 %. Дальнейшее совершенствование цикла возможно за счет повышения верхнего давления в цикле Брайтона с введением охлаждения сжимаемого в компрессоре воздуха и промперегрева при расширении рабочего тела в ГТ.

ГТУ с промежуточным охлаждением и с промперегревом ГТ-100 была разработана в нашей стране в 60-е годы на Ленинградском металлическом заводе [1]. В ГТ-100 была применена степень повышения давления воздуха в компрессоре около 30. Даже при относительно низкой температуре газов 750 °С применение такой схемы позволило увеличить мощность ГТ-100 почти в 2 раза и повысить КПД на 4 % по сравнению с ГТУ простейшей схемы.

В [2] выполнена оценка совершенства элементов современных газотурбинных установок с использованием программного продукта Thermoflow. При умеренных степенях повышения давления промежуточное охлаждение и промежуточный подогрев приводят к снижению экономичности установки (при степени повышения давления  $\pi_k = 16$  при одновременном применении промохлаждения и подогрева КПД установки снижается на 1,68% по сравнению с ГТУ простого цикла). С ростом степени повышения давления ( $\pi_k \approx 26-28$ ) КПД таких установок приближается к КПД ГТУ простого цикла. При повышении степени сжатия эффективность цикла возрастает. Так, при повышении  $\pi_k$  до 40 совместное применение охлаждения и подогрева повышает КПД ГТУ на 1,42% (рис. 1).

Основным преимуществом схем ГТУ с промподогревом и промохлаждением является повышение удельной мощности установки. При  $\pi_k = 8$  относительное повышение удельной мощности составляет 31,6 % при применении промохлаждения и промподогрева. При росте величины  $\pi_k$  влияние промохлаждения и промподогрева на удельную мощность ГТУ усиливается, и при  $\pi_k = 40$  комбинация промохлаждения и подогрева приводит к повышению удельной мощности на 112,6 % (рис. 2).

Однако высокий КПД газотурбинной установки не гарантирует высокий КПД ПГУ. Так, в одной из последних разработок фирмы General Electric газовой турбине LMS-100 реализовано промежуточное охлаждение воздуха. Степень повышения давления в этой установке достигает 40, а КПД при работе в простом цикле достигает 46 % [3].

Но несмотря на высокие показатели экономичности в простом цикле, ПГУ на базе газовой турбины LMS100 имеет невысокий КПД – 51-52 %. Это объясняется, в первую очередь, низкой температурой газов на выходе ГТУ (при температуре наружного воздуха 15 °С температура газов за ГТУ составляет 415 °С) и, соответственно низким потенциалом уходящих газов ГТУ LMS100.

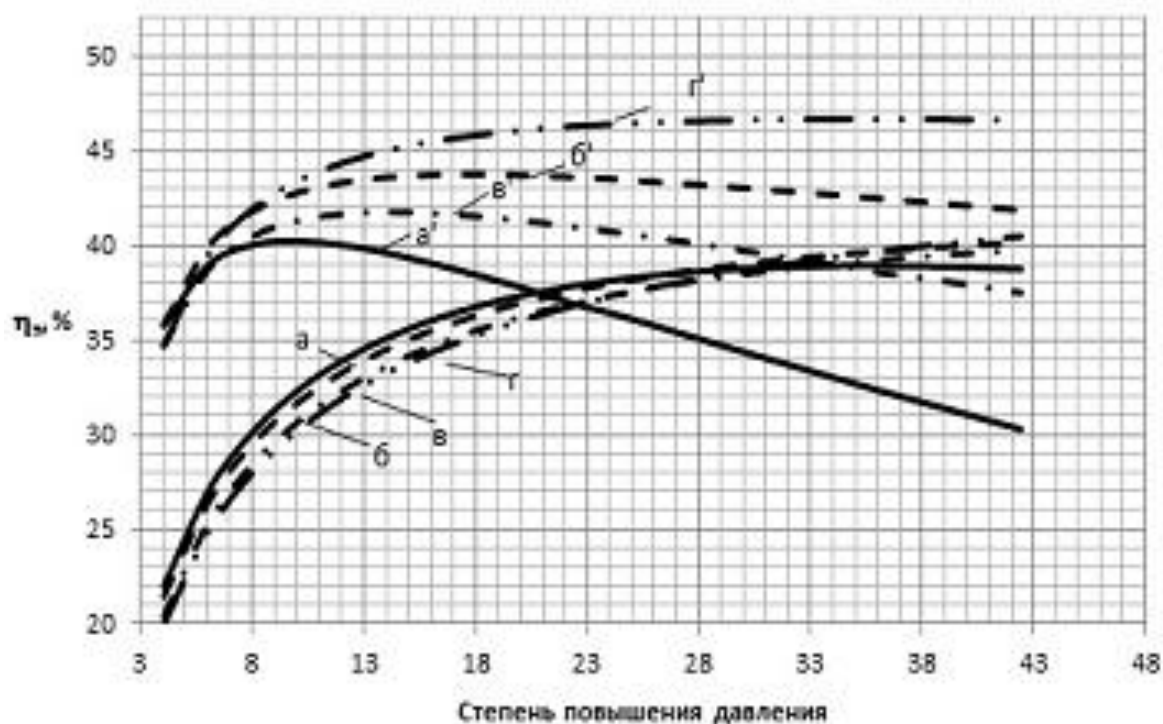


Рис. 1. Влияние степени повышения давления на КПД различных схем ГТУ:  
*а* – простого цикла, *б* – с промощаждением, *в* – с промощаждением, *г* – с промощаждением и промощаждением, *а'* – с регенерацией, *б'* – с регенерацией и промощаждением, *в'* – с регенерацией и промощаждением, *г'* – с регенерацией, промощаждением и промощаждением

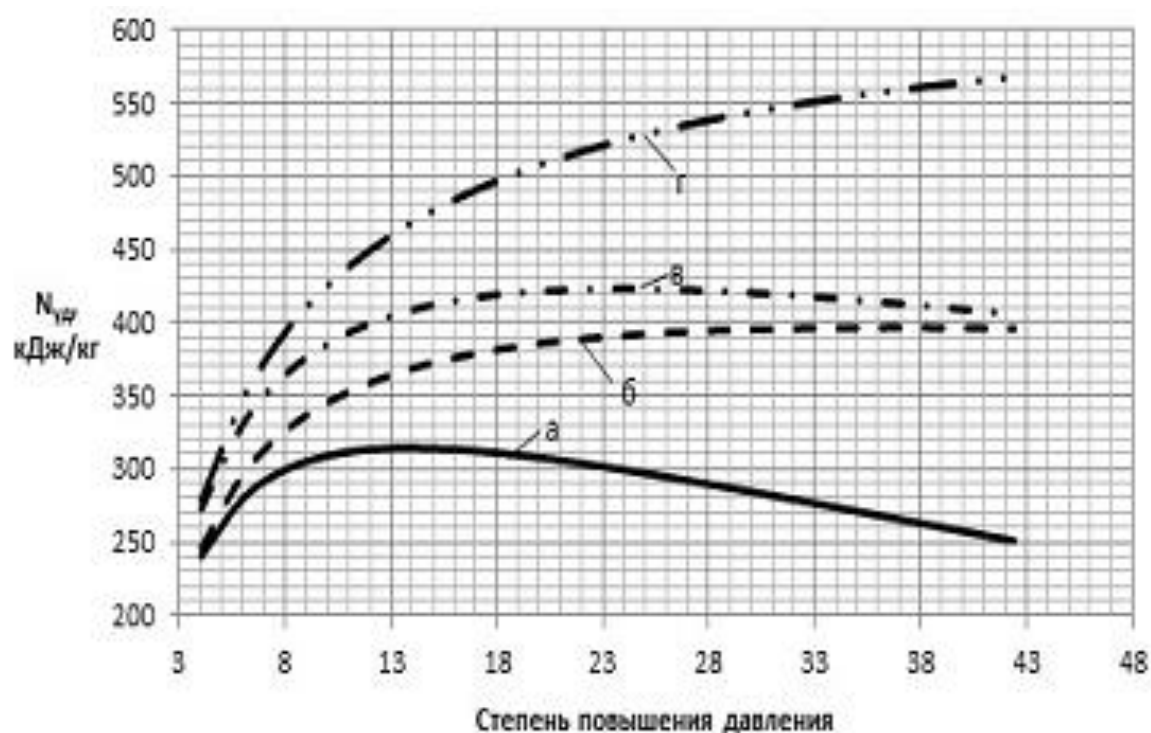


Рис. 2. Влияние степени повышения давления на удельную мощность ГТУ:  
*а* – ГТУ простого цикла, *б* – ГТУ с промощаждением, *в* – ГТУ с промощаждением, *г* – ГТУ с промощаждением и промощаждением

Удельная полезная работа и КПД возрастают при введении промежуточного охлаждения в компрессоре для любых комбинаций  $T_{\text{вх}}^{\text{ГТ}}$  и  $\pi_{\text{к}}$  (рис. 3). Однако при низких значениях  $\pi_{\text{к}}$  эффект от промежуточного охлаждения минимален и прирост КПД незначителен.

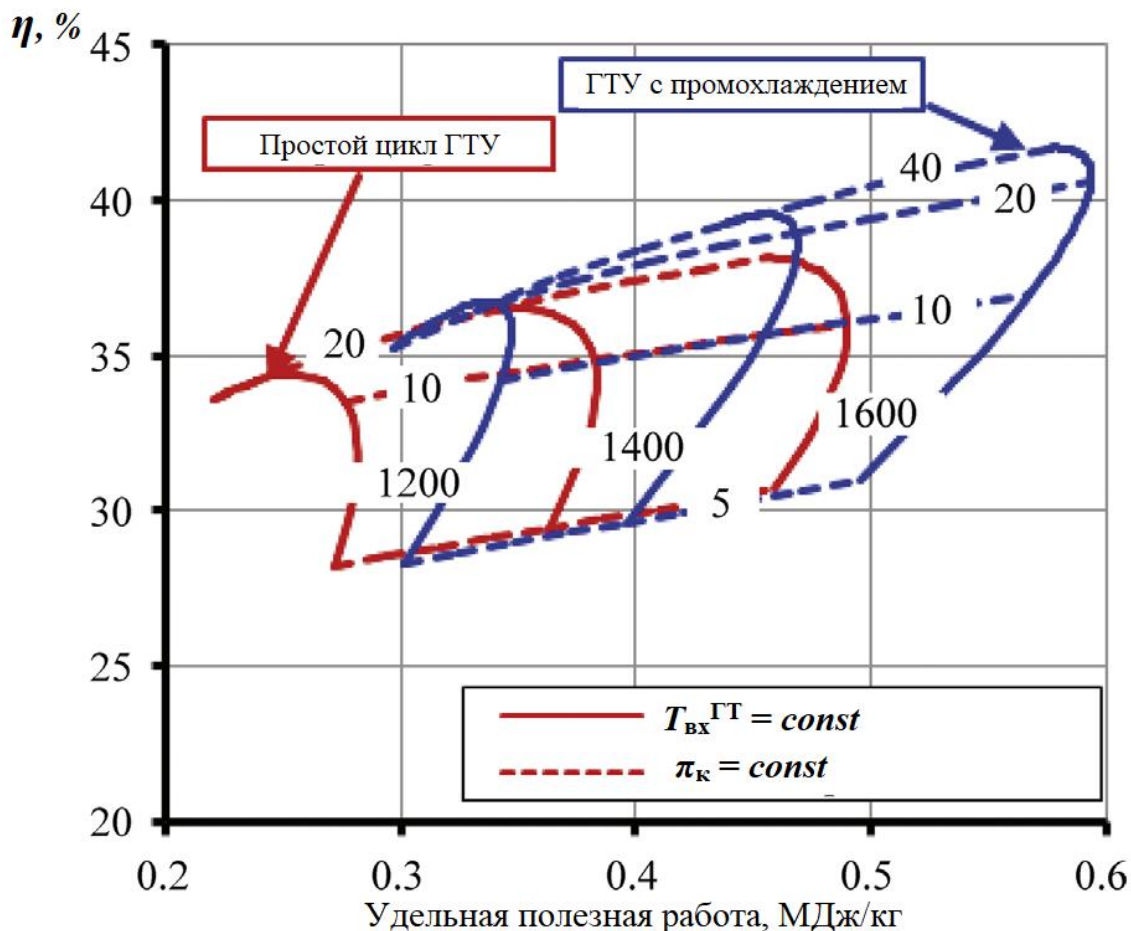


Рис. 3. Характеристики простого цикла ГТУ и цикла ГТУ с промежуточным охлаждением при различных степенях повышения давления и начальных температурах

Увеличение начальной температуры газов обеспечивает повышение КПД и полезной удельной работы цикла ГТУ. Максимально возможная температура на входе в ГТ определяется достигнутым технологическим уровнем металлургии и развитием технологий охлаждения. Влияние охлаждающих потоков необходимо учитывать, иначе расчетные оптимальные значения параметров будут далеки от реальных. Так, например, в случае игнорирования влияния охлаждающих потоков при  $T_{\text{вх}}^{\text{ГТ}} = 1600 \text{ К}$  и  $\pi_{\text{к}} = 60$  удельная полезная работа ГТУ превышает расчетное значение с учетом охлаждения на 20 %, а КПД — на 5 %. Сравнение показателей цикла ГТУ без учета охлаждения и с учетом охлаждения газовой турбины приведено на рис. 4.

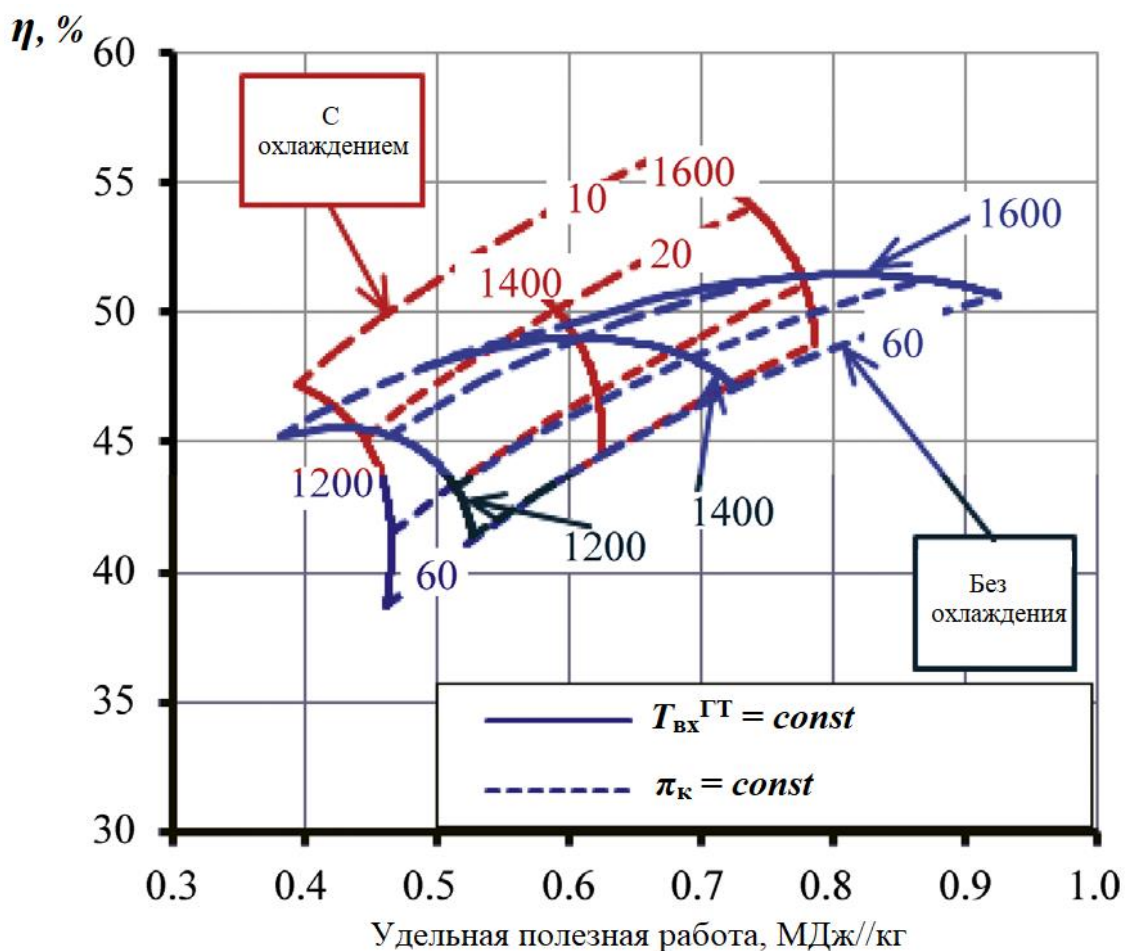


Рис. 4. Сравнение характеристик ГТУ без учета и с учетом системы охлаждения ГТ при различных  $T_{\text{вх}}^{\text{ГТ}}$  и степени повышения давления  $\pi_k$

Таким образом, применение промежуточного охлаждения воздуха и подогрева газов позволяет повысить эффективность применения газотурбинных установок в составе ПГУ.

#### Список использованных источников

1. Кострова Т.А., Длугосельский В.И., Грибов В.Б. Выбор оптимального режима работы газотурбинных установок типа ГТ-100-740-2 на ГРЭС-3 Мосэнерго // Теплоэнергетика. 1981. №6. – С. 44-47.
2. Цанев С.В., Буров В, Д., Пустовалов П.А. К вопросу о карнотизации цикла Брайтона энергетических газотурбинных установок // Энергосбережение и водоподготовка. 2010. №6. – С.2-6.
3. Reale M. J. New High Efficiency Simple Cycle Gas Turbine – GE's LMS100. [https://powergen.gepower.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en\\_US/documents/technical/ger/ger-4222a-new-high-efficiency-simple-cycle-gas-turbine-lms100.pdf](https://powergen.gepower.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en_US/documents/technical/ger/ger-4222a-new-high-efficiency-simple-cycle-gas-turbine-lms100.pdf) .
4. Nada T. Performance characterization of different configurations of gas turbine engines // Propulsion and Power Research. 2014. – P. 121-132.